

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

**Vyšetření odporu a vztlaku při obtékání těles
různého tvaru**

**Investigation of Drag and Lift Coefficient During
the Flow over Different Bodies**

Student: Jiří Kukelka
Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Kukelka**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Vyšetření odporu a vztlaku při obtékání těles různého tvaru**
Investigation of Drag and Lift Coefficient During the Flow over
Different Bodies

Zásady pro vypracování:

1. Popište silové účinky při obtékání těles proudem skutečné tekutiny
2. Uveďte faktory ovlivňující velikost odporu a vztlaku
3. Popište experimentální zařízení pro měření silových účinků při obtékání těles
4. Poved'te měření síly odporu a vztlaku pro tělesa různého tvaru
5. Porovnejte získané výsledky s teoretickými předpoklady

Seznam doporučené odborné literatury:

DRÁBKOVÁ, S. et al. *Mechanika tekutin*. [1 DVD-R: barev.] Vyd. 1. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1508-4. [online]. Ostrava: VŠB- TU Ostrava, Fakulta strojní, 2007.
E-learning systém FS VŠB -TUO. Dostupné z WWW: <http://vyuka.fs.vsb.cz> .
NOSKIEVIČ, J. a kol. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL, 1987. 354 str.
BROŽ, V. *Aerodynamika nízkých rychlostí*. Praha: ČVUT, 2001.
© Auld 2001-2010 – www.aerodynamics4students.com

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23. 5. 2011

.....

Jiří Kukelka

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se úplně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 23. 5. 2011

.....

Podpis

Jiří Kukelka
A.Dvořáka 709
Studénka, 74213

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KUKELKA, Jiří. *Vyšetření odporu a vztlaku při obtékání těles různého tvaru: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2011, 47 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá vyšetřením odporu a vztlaku při obtékání těles různého tvaru. První část je věnována úvodu do teorie proudění a obtékání těles. Druhá část se zaměřuje na laboratorní měření na aerodynamickém přístroji firmy HELAGO a měření vrtulkovým anemometrem. Měření odporu a vztlaku je provedeno pro předměty různého tvaru a pro různé rychlosti proudění vzduchu. V poslední části práce jsou provedeny výpočty součinitele odporu z naměřených hodnot pro každé těleso a provedeno jejich porovnání s tabulkovými hodnotami.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KUKELKA, Jiří. *Investigation of Drag and Lift Coefficient During the Flow over Different Bodies: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Systems, 2011, 47 p. Thesis Head: doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

The bachelor thesis deals with investigation of drag and lift coefficient during the flow over different bodies. The first part is devoted to an introduction to the theory of flow and flow over bodies. The second part concentrates on laboratory measurements of aerodynamic instrument from company HELAGO and measurement with propeller anemometer. Measurement of drag and lift was made for objects of different shapes and for different velocity of air flow. In the last part of the work the calculations of drag coefficient from the measured values was done for each object and the results were compared with tabular values.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	7
1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY PROUDĚNÍ	8
1.1 Rozdělení proudění	8
1.2 Proudění skutečných kapalin	9
1.3 Navier-Stokesova rovnice	10
1.4 Laminární proudění	11
1.5 Turbulentní proudění	11
2. SILOVÉ ÚČINKY PŘI OBTÉKÁNÍ TĚLES PROUDEM SKUTEČNÉ TEKUTINY	13
2.1 Mezní vrstva	13
2.2 Úplav	15
2.3 Letecký profil – profil křídla	15
2.4 Vztahová síla	16
2.5 Odpor tělesa	17
2.6 Třecí odpor	17
2.7 Tlakový odpor	18
2.8 Indukovaný odpor	18
2.10 Součinitel odporu pro vybraná tělesa	19
3. EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ PŘI OBTÉKÁNÍ TĚLES	21
5.1 Prvky aerodynamického zařízení HELAGO	21
5.2 Sada těles pro měření odporu	24
5.3 Ventilátor HRD 1 TFU-105/1	26
5.4 Vrtulkový anemometr ALMEMO	28
4. MĚŘENÍ SÍLY ODPORU A VZTLAKU PRO TĚLESA RŮZNÉHO TVARU	29
4.1 Měření na aerodynamickém přístroji HELAGO	30
4.2 Měření na ventilátoru HRD 1 TFU 105/1	34
5. GRAFICKÉ SHRNUÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	39
6. ZÁVĚREČNÉ SHRNUÍ	43
7. PŘÍLOHY	44
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	45

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

F_p	Tlakový odpor	[N]
F_t	Třecí odpor	[N]
F_x	Odpor tělesa	[N]
F_y	Vztlaková síla	[N]
F_z	Boční síla	[N]
M_x	Klonivý moment	[N.m]
M_y	Klopivý moment	[N.m]
M_z	Zatáčivý moment	[N.m]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
S	Charakteristická plocha	[m ²]
S_p	Plocha příčného průřezu tělesa	[m ²]
S_t	Plocha styku s tekutinou	[m ²]
c_p	Součinitel tlakového odporu	[-]
c_t	Součinitel třecího odporu	[-]
c_x	Součinitel odporu	[-]
c_y	Součinitel vztlaku	[-]
d	Charakteristický rozměr (průměr)	[m]
f	Frekvence	[s ⁻¹]
v	Rychlost proudění	[m.s ⁻¹]
α	Úhel náběhu	[°]
η	Dynamická viskozita	[Pa.s]
ν	Kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
ρ	Hustota kapaliny	[kg.m ⁻³]
τ	Tečné (smykové) napětí	[Pa]

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY PROUDĚNÍ

Pohyb tekutiny nazýváme prouděním, tokem nebo tečením. Zkoumáním proudění se zabývá mechanika tekutin, respektive část, která se nazývá nauka o proudění. Nauka o proudění se pak dále dělí na dva obory podle druhu tekutiny. Hydrodynamika se zabývá prouděním kapalin, kde nejznámějším a zároveň nejjednodušším příkladem je pohyb tzv. nevazké (ideální) kapaliny. Aplikovaná hydrodynamika se zabývá prouděním, kde se více přihlíží na skutečné poměry, výsledky experimentálních prací a teoretické poznatky. Aplikovanou hydrodynamikou rozumíme také hydrauliku. Aerodynamika se zabývá prouděním vzduchu kolem obtékaného tělesa. V dnešní době nachází aerodynamika uplatnění především v leteckém a automobilovém průmyslu, ale také např. ve sportovních a mnoha dalších odvětvích. [1], [2]

1.1 Rozdělení proudění

1) Podle kinematického hlediska

a) Uspořádání proudění v prostoru

- Proudění prostorové neboli trojrozměrné
- Proudění rovinné neboli dvourozměrné
- Proudění jednorozměrné

b) Rozložení rychlosti v prostoru

- Rovnoměrné proudění
- Nerovnoměrné proudění

c) Závislost proudění na čase

- Ustálené (stacionární) proudění nezávislé na čase
- Neustálené (nestacionární) proudění, veličiny závislé na čase

2) Podle vlastnosti tekutin

a) Proudění ideální (dokonalé) kapaliny

- Potencionální (nevířivé) proudění – pohyb částic je přímočarý nebo křivočarý po drahách, které se vůči pozorovateli neotáčejí kolem vlastní osy.
- Potencionální vír – částice rotují kolem vírového vlákna potencionálně s výjimkou částice, která tvoří vírové vlákno.
- Vířivé proudění – částice se natáčejí kolem vlastních os z pohledu pozorovatele.

b) Proudění skutečné kapaliny

1.2 Proudění skutečných kapalin

Rozdíl mezi skutečnými tekutinami a dokonalými tekutinami spočívá v tom, že skutečné tekutiny na rozdíl od dokonalých tekutin jsou stlačitelné a viskózní. U proudění skutečných kapalin se projevuje viskozita tekutin tak, že vedlejší částice na sebe působí třecí silou. Při překonávání viskózního odporu se zmenšuje mechanická energie kapaliny, z tohoto důvodu dojde k poklesu rychlosti, tlaku nebo polohové energie. Zmařená energie při překonávání těchto odporů se přemění v tepelnou energii. Tato změna energie je nevratná. Při proudění skutečných kapalin je také třeba znát dynamickou viskozitu odvozenou z Newtonova zákona (1.2.1), kde dv/dy je gradient rychlosti ve směru kolmém na směr pohybu a kinematickou viskozitu kapaliny (1.2.2). [1]

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \quad (1.2.1)$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.2.2)$$

Proudění skutečných kapalin dělíme na laminární a turbulentní proudění. Toto rozdělení je možné díky britskému inženýru a vědci Osbornu Reynoldsovi, který zkoumal dynamiku kapalin a stanovil kritérium pro přechod laminárního proudění na turbulentní proudění. Toto kritérium nazýváme jako Reynoldsovo číslo (1.1.3), kde v je rychlost proudění, d je charakteristický rozměr např. průměr potrubí a ν je kinematická viskozita proudící tekutiny. Jeho hodnota pro přechod z laminárního na turbulentní proudění je rovna 2320.

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (1.2.3)$$

1.3 Navier-Stokesova rovnice

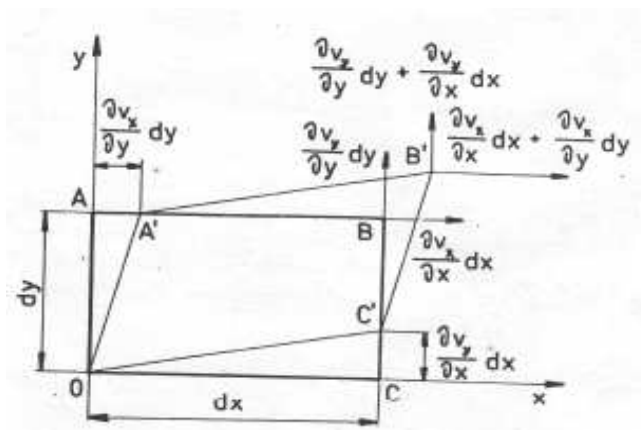
Rovnovážný stav sil při proudění skutečné tekutiny je popsán rovnicí kontinuity (1.3.1) a Navier-Stokesovými rovnicemi (1.3.2). Při odvození Navier-Stokesovy rovnice se postupuje stejně jako u Eulerovy rovnice (1.3.3) hydrodynamiky, avšak kromě sil tlakových, vnějších a setrvačných spojených s vlastním pohybem částic tekutiny, přistupují u skutečné tekutiny třecí síly, které způsobuje viskozita tekutiny. Pro proudění nestlačitelné tekutiny lze uvést tyto rovnice ve tvaru:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1.3.1)$$

$$\vec{a} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \vec{v} \cdot \Delta \vec{v} = \vec{v} \cdot \text{grad} \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (1.3.2)$$

$$\vec{a} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p = \vec{v} \cdot \text{grad} \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (1.3.3)$$

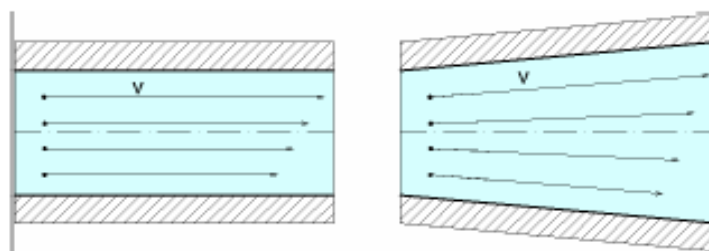
Vzájemně pohybující se částice vytvářejí ve skutečné tekutině tečná napětí, která způsobují úhlovou deformaci částic. Na elementární objem skutečné tekutiny v podobě hranolku o rozměrech dx , dy , dz působí na jeho plochách tečná napětí viz obr. 1.1. Složky tečného napětí se označí dvěma indexy, přičemž první index značí osu, na niž je příslušná elementární plocha kolmá, druhý index označuje osu, na niž je tečné napětí rovnoběžné. [4], [19]



Obr. 1.1 Elementární částice skutečné kapaliny [6]

1.4 Laminární proudění

Laminární proudění viz obr. 1.2 je výrazně jednodušší než proudění turbulentní. Laminární proudění můžeme pozorovat tam, kde jsou menší průtokové rychlosti, větší viskozita kapaliny a menší průtočné kanály. Výsledkem je pohyb částic tekutiny v tenkých vrstvách, aniž by se pohybovali po průřezu. Při řešení laminárního proudění se uplatňuje Newtonův zákon viskozity (1.4.1), který odpovídá skutečnosti, z tohoto důvodu se dosahuje dobrá shoda s experimentálními výsledky.



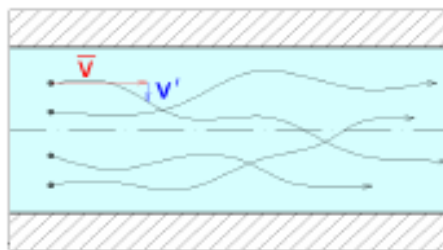
Obr. 1.2 Laminární proudění [2]

Laminární proudění je možno řešit integrací Navier-Stokesových rovnic. Pro složitější případy proudění se používají numerické metody, některé jednodušší případy laminárního proudění se dají řešit exaktně. Předpokládá se izotermické proudění, tj. s konstantní teplotou kapaliny a tím konstantní viskozitou, ustálené proudění nestlačitelné kapaliny, které je vyvoláno tlakovým spádem nebo unášením, případně oběma způsoby. [2], [3]

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (1.4.1)$$

1.5 Turbulentní proudění

Slovo turbulence znamená nepokoj, neukázněnost, zmatek, nepravidelnost, nahodilost, divokost, bouřlivost. Definice turbulentního proudění není prozatím jednotně stanovena, v jednotlivých definicích se zdůrazňují zpravidla jen některé znaky. Turbulentní proudění je trojrozměrný, časově proměnný pohyb tekutiny, při kterém každá veličina např. tlak, hustota, rychlost, teplota aj. mění náhodně. Turbulentní proudění avšak nelze zcela definovat za náhodné. Popis turbulentního proudění je uskutečněn rovnicemi pro prostorové proudění. Turbulentní proudění, viz obr. 1.3, obsahuje uspořádané skupiny vírů zvané „koherentní struktury“. K těmto poznatkům se dospělo za posledních několik desítek let, díky stále se zdokonalujícím experimentálním metodám. [3]

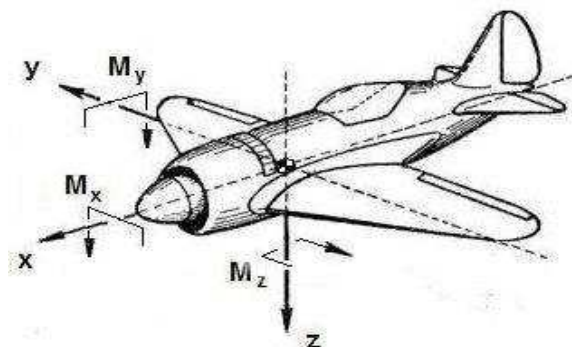


Obr. 1.3 Turbulentní proudění [2]

Při vyšších Reynoldsových číslech částice tekutiny konají neuspořádaný pohyb všemi možnými směry. Podmínkou vzniku turbulentního proudění je, aby Reynoldsovo číslo dosáhlo hodnoty větší než kritická hodnota 2320. Částice tekutiny mají také kromě podélné rychlosti turbulentní (fluktuační) rychlost, jenž se přemísťuje po průřezu.

2. SILOVÉ ÚČINKY PŘI OBTÉKÁNÍ TĚLES PROUDEM SKUTEČNÉ TEKUTINY

Při pohybu tělesa v tekutině nebo obtékání tělesa tekutinou vznikají síly a momenty. Výslednice těchto sil můžeme rozložit na tři složky, odpor tělesa F_x , vztlaková síla F_y a boční sílu F_z . K těmto třem silovým složkám patří ještě klopivý moment M_z , klonivý moment M_x a zatačivý moment M_y viz obr. 2.1.



Obr. 2.1 Síly a momenty působící na obtékané těleso [8]

Je-li těleso v rozlehlém proudu tekutiny, určení rychlostního a tlakové pole kolem tělesa není snadnou záležitostí. Při provedení výpočtu s modelem nevazké tekutiny dostáváme nulový odpor, což je v rozporu s D'Alembertovým paradoxem, protože i při obtékání tělesa vzduchem, který má velmi malou viskozitu vždy vzniká odpor (aerodynamický). Experimentálním zkoumáním bylo zjištěno, že při velkých Reynoldsových číslech sahá vliv viskozity jen do malé vzdálenosti od povrchu tělesa, tuto část povrchu tělesa nazýváme mezní vrstva. Při obtékání těles skutečnou tekutinou se mění směr i velikost rychlosti tekutiny, která obtéká kolem tělesa. Za působení viskozity tekutiny se vyvolávají silové účinky mezi proudící tekutinou a obtékaným tělesem. [1], [3], [7]

2.1 Mezní vrstva

Mezní vrstva má velký význam v aerodynamice i při obtékání těles, protože metody výpočtu třecího odporu jsou založeny na teorii mezní vrstvy. Pojem mezní vrstva zavedl německý fyzik Ludwig Prandtl. Pojem mezní vrstva se dá názorně vysvětlit na příkladu obtékání rovinné desky umístěné v rovnoběžném proudu tekutiny, při čemž deska má stejný směr jako proudnice. Částice tekutiny před deskou mají všechny stejnou rychlost i směr. Částice, které jsou na desce mají rychlost nulovou, v blízkosti desky jsou částice tekutiny brzděny pomalejšími částicemi u obtékaného povrchu. Část jejich kinetické

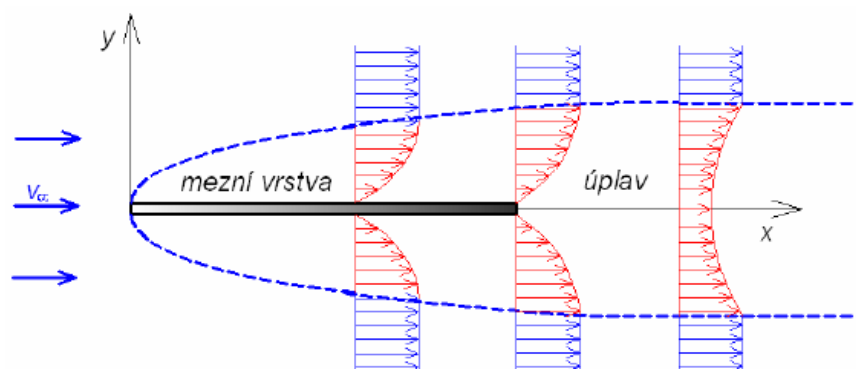
energie se přeměňuje třením na teplo. Oblast v těsné blízkosti stěny desky, kde se mění rychlost, neboli kde existuje gradient rychlosti a tedy platí nerovnost (2.1.1) se nazývá mezní vrstva.

$$\frac{\partial v}{\partial y} \neq 0 \quad (2.1.1)$$

Tření na desce stále brzdí částice tekutiny, přinášejí se částice vzdálenější od povrchu do mezní vrstvy. Protože do mezní vrstvy vstupují další částice tekutiny, mezní vrstva směrem po proudu stále narůstá. Rychlostní profily mají spojitý přechod od nulové rychlosti na stěně do plné rychlosti ve vnějším proudu. Pro další posouzení mezní vrstvy je vhodné zavést Reynoldsovo číslo Re_x (2.1.2).

$$Re_x = \frac{v_\infty \cdot x}{\nu} \quad (2.1.2)$$

V dostatečné vzdálenosti od náběžné hrany jsou si rychlostní profily podobné a nezávislé na vzdálenosti x . Má-li nabíhající proud nulovou turbulentci, vznikne na začátku desky laminární mezní vrstva, která pro $Re_x=500\,000$ přechází v mezní vrstvu turbulentní s laminární podvrstvou. Mezi laminární a turbulentní mezní vrstvou existuje jistá přechodná oblast. Má-li nabíhající proud určitou turbulentci, potom na počátku desky laminární mezní vrstva nevznikne a turbulentní mezní vrstva se může nastavit již od náběžného bodu. Dle typu mezní vrstvy se určuje koeficient c_x a tloušťka mezní vrstvy Δt .



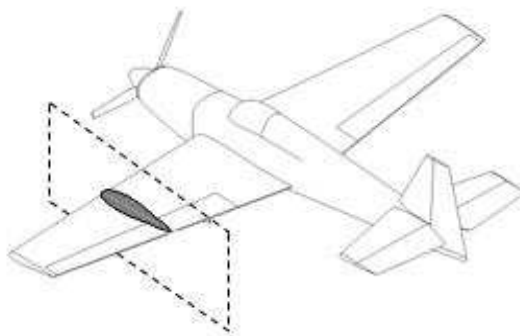
Obr. 2.2 Mezní vrstva při obtékání desky [2]

2.2 Úplav

Mezní vrstva, která se na povrchu obtékaného tělesa (profilu) vytvoří, se dá velmi zjednodušeně představit také tak, že na spodní straně i horní straně vznikají vírová vlákna (provazce), při čemž smysl rotace vírových vláken na horní ploše je opačný, než na spodní ploše. Vírová vlákna jsou proudící tekutinou unášena za těleso, kde zpomalené částice v mezní vrstvě a částice z odtrženého proudu vytvářejí za tělesem úplav. Když je těleso obtékáno bez odtržení mezní vrstvy je úplav tvořen částicemi, které prošly mezní vrstvou tělesa a jejich rychlost je zmenšena. V úplavu nejsou zpětná proudění, jsou v něm pouze pokračování spojených mezních vrstev. V tomto případě je tvar úplavu totožný jak pro turbulentní, tak i pro laminární vrstvu. V turbulentní mezní vrstvě lze očekávat rychlejší rozšiřování a vyrovnaní profilu úplavu. [7]

2.3 Letecký profil – profil křídla

Pod pojmem profil křídla rozumíme plochu řezu křídla rovnoběžnou s proudnicemi a kolmou na plochu (základní rovinu křídla) viz obr. 2.2. Základními znaky tvaru profilu křídla je horní a spodní obrys, náběžný a odtokový bod. Spojnice náběžného a odtokového bodu se nazývá tětíva profilu a vzdálenost náběžného a odtokového bodu udává hloubku profilu. Střední křivka profilu vznikne spojením středů kružnic vepsaných do obrysu profilu. U střední křivky profilu je důležité velikost a poloho jejího největšího prohnutí od tětivy profilu. [10]

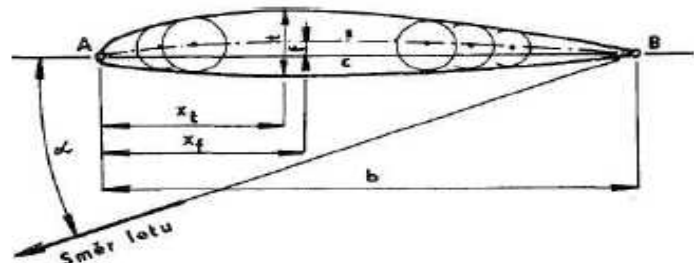


Obr. 2.3 Letecký profil v základní rovině křídla [9]

Základní znaky leteckého profilu

- Náběžný bod – A
- Odtokový bod – B
- Tětíva profilu – c
- Střední křivka profilu – s
- Maximální tloušťka profilu – t
- Maximální prohnutí – f

- Vzdálenost maximální tloušťky – x_t
- Vzdálenost maximálního prohnutí – x_f
- Hloubka profilu – b
- Úhel náběhu – α

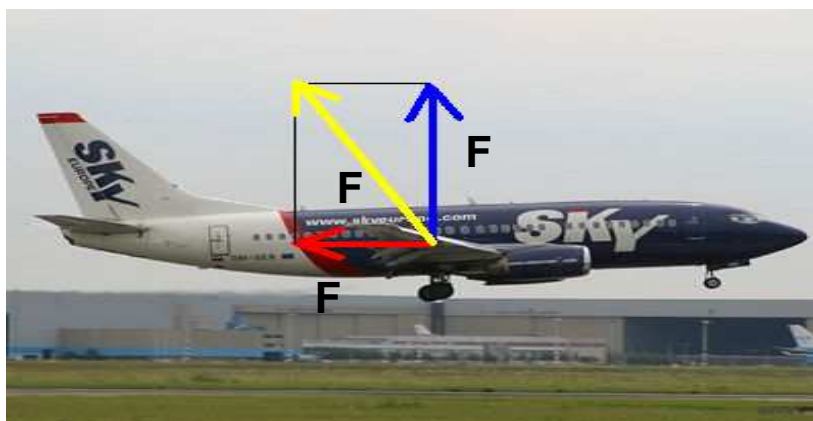


Obr. 2.4 Základní znaky leteckého profilu [10]

2.4 Vztlková síla

Jako vztlakovou sílu rozumíme sílu, která je kolmá na směr pohybu tělesa např. křídla, dále zde působí odporová síla (2.5.1), výslednou sílu pak nazýváme aerodynamickou silou viz obr. 2.4. Vznik vztlaku na křídle můžeme vysvětlit vznikem rozdílných tlaků na horní a dolní ploše křídla. Vztlak vzniká z rozdílných rychlostí proudění vzduchu nad horní plochou křídla a pod dolní plochou křídla. Tento jev je způsoben asymetrickým tvarem křídla. Vztlak můžeme pozorovat i u ostatních těles, které jsou obtékány vzduchem, avšak jejich součinitel vztlaku není tak vysoký, jako součinitel vztlaku křídla, které je navrženo pro co nejvyšší vztlak. Vztlak je definován rovnicí (2.4.1), kde c_y je součinitel vztlaku. [10], [18]

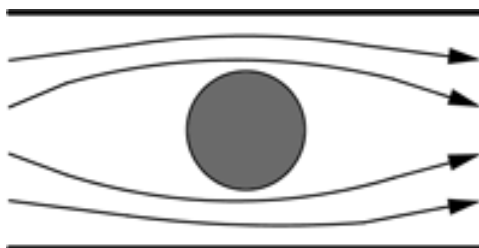
$$F_Y = F_{vz} = c_Y \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.4.1)$$



Obr. 2.5 Síly působící na křídlo při letu [17]

2.5 Odpor tělesa

Je-li těleso obtékáno ideální tekutinou viz obr. 2.5, tedy takovou, která má nulovou viskozitu, proudnice sledují povrch obtékaného tělesa, proudové pole je symetrické okolo vodorovné i svislé osy a proto je odpor tělesa nulový.



Obr. 2.6 Obtékání tělesa ideální tekutinou [11]

V případě, že je těleso obtékáno skutečnou tekutinou, se celkový odpor rozkládá na třecí odpor (ovlivňuje viskozita), tlakový odpor (způsobený nesymetrickým rozdělením tlaku na povrchu tělesa) a indukovaný odpor. V důsledku odporu tělesa se mění směr i velikost vektoru rychlosti tekutiny. Vlivem viskozity vznikají silové účinky dané integrálem tečných sil na povrchu obtékaného tělesa. Vzniká také nerovnoměrné rozdělení tlaku na povrchu obtékaného tělesa, v důsledku toho dochází ke vzniku odporové síly. Odpor tělesa je definován rovnicí, kterou odvodil Newton (2.5.1). V této rovnici je c_x jako součinitel odporu, S jako charakteristická plocha tvořená u těles jejich příčným průřezem a u leteckého profilu nosnou plochou křídla a v jako rychlost nenarušeného proudu před obtékaným tělesem. [7]

$$F_x = c_x \cdot S \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (2.5.1)$$

2.6 Třecí odpor

Třecí odpor je výsledným silovým účinkem tečných napětí v mezní vrstvě na povrchu obtékaného tělesa. Třecí odpor je dán rovnicí (2.6.1), kde c_t je součinitel třecího odporu, S_t plocha na níž se tělese stýká s tekutinou (velikost smočené plochy) a ρ hustota tekutiny.

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_t \cdot S_t \cdot v^2 \quad (2.6.1)$$

2.7 Tlakový odpor

Tlakový odpor viz obr. 2.6 je způsoben odtržením proudu od tělesa a vznikem vířivé oblasti. Proudnicice neopisují důkladně tvar obtékaného tělesa následkem viskózního tření, kdy dochází k úbytku kinetické energie částic na nulu v mezní vrstvě, a následkem setrvačnosti částic při značném zakřivení proudu. Tlakový odpor je dán rovnicí (2.7.1), kde c_p je součinitel tlakového odporu a S_p příčný průřez tělesa.

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \cdot S_p \cdot v^2 \quad (4.3)$$

2.8 Indukovaný odpor

Indukovaný odpor vzniká při obtékání těles konečné délky a je spojen se vznikem vztlakové síly. Například na konci křídel letadel vznikají okrajové víry viz obr. 2.7, které shromažďují na křídle síly proti pohybu tzn. zvyšují odpor tělesa. Ve většině případů se vyskytuje konečný odpor, který se skládá z tlakového a třecího odporu a nelze je zjistit měřením odděleně. V těchto případech se vyjadřuje rovnicí pro celkový odpor (4.1), kde plocha S_p může být stanovena jako plocha S_r . Představy o mechanismu třecího odporu těles obtékaných proudem tekutiny a metody výpočtu třecího odporu se zakládají na teorii mezní vrstvy. [14], [18]



Obr. 2.7 Tlakový odpor při obtékání kolem draku stíhacího letounu F-16 [13]

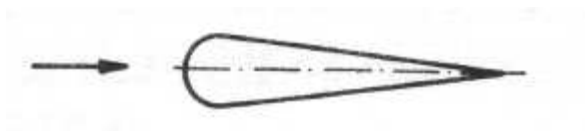


Obr. 2.8 Okrajové víry na konci křídel stíhacího letounu F-18 [12]

2.10 Součinitel odporu pro vybraná tělesa

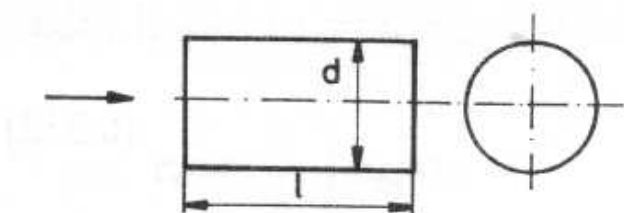
Hodnota součinitele odporu se určuje experimentálně pro každé těleso, neboť závisí na tvaru zkoumaného tělesa a kvalitě povrchu. Její výpočet je prakticky nemožný.

Profil minimálního odporu



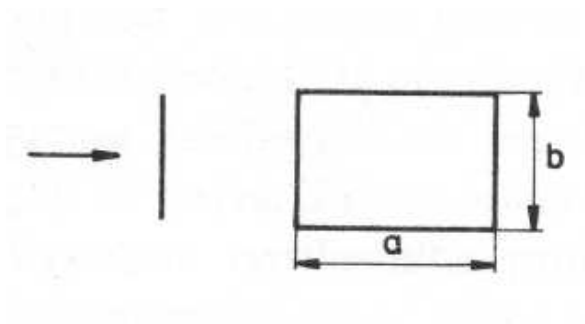
$$c = 0,003 - 0,01$$

Válec



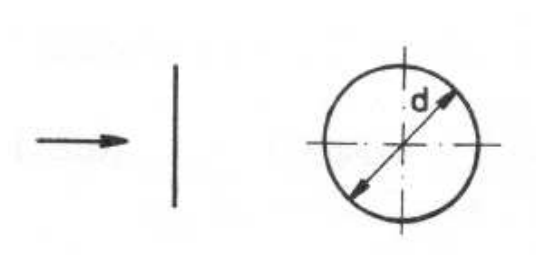
$\frac{l}{d}$	c
1	0,91
2	0,85

Deska



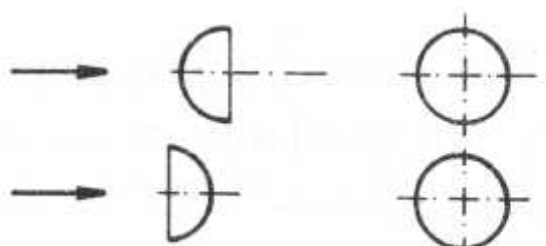
$\frac{a}{b}$	c
1	1,1
2	1,15
4	1,19
10	1,29
18	1,4

Kruhová deska



Re	c
2	10
20	2,8
200	1,4
2000	1,15

Polokoule



$$c = 0,3 - 0,4$$

$$c = 1,35 - 1,4$$

3. EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ PŘI OBTÉKÁNÍ TĚLES

Měření silových účinků při obtékání těles je realizováno na aerodynamické přístroji firmy HELAGO. Sestava se skládá z generátoru vzdušného proudu (ventilátor), vzduchové trysky, váhy pro měření silového účinku při obtékání těles a sady těles. Po důkladném proměření vrtulkovým anemometrem ALMEMO bylo určeno, že generátor vzdušného proudu propojený hadicí s tryskou nedává konstantní proudové pole v požadované vzdálenosti, kterou uvádí výrobce a rychlosti proudu vzduchu kolísají. Naměřený rychlostní profil je přiložen viz příloha A. Proto jsem nahradil generátor vzdušného proudu ventilátorem (dmychadlem) pro vysoké tlaky HRD 1 TFU-105/1 opatřeným frekvenčním měničem 101651/AR, který dodává podstatně rovnoměrnější proudové pole.

5.1 Prvky aerodynamického zařízení HELAGO

Vzduchová tryska

Vzduchová tryska viz obr. 5.1 a viz obr. 5.2 vypouští téměř laminární proud vzduchu a rozšiřuje proud vzduchu z ventilátoru. Tryska je připevněna na držáku a neobsahuje žádné pohyblivé části. Vzduch, který vychází z trubicovitých trysek blízko plastového kruhu se mísí s okolním vzduchem a vytváří tak proud vzduchu o velkém průměru.



Obr. 5.1 Vzduchová tryska HELAGO [15]



Obr. 5.2 Vzduchová tryska HELAGO
v laboratoři fakulty, místnost E309 [16]

Parametry vzduchové trysky

- **Otvor pro přívod vzduchu :** 33 mm
- **Otvor pro odvod vzduchu :** 120 mm
- **Počet trubiček :** 46
- **Vnitřní průměr trubičky :** 3,5 mm
- **Délka :** 255 mm
- **Průměr :** 150 mm
- **Váha :** 0,35 Kg

Generátor vzdušného proudu – ventilátor

Ventilátor viz obr. 5.3 a viz obr. 5.4 slouží k vytváření vzdušných proudů, které jsou pomocí hadice přivedeny do vzduchové trysky. Třecí ztráty mezi ventilátorem a vzduchovou tryskou (vývodem z trubiček) jsou velmi vysoké. Vzduchová tryska a ventilátor jsou propojeny plastovou hadicí o průměru 33 mm a délce 1,5 m. Vzduch do ventilátoru je nasáván otvorem v zadní části ventilátoru, na otvor je možno přidělat hadici. Na ventilátoru je umístěno manuální ovládání pro zvýšení či snížení otáček, resp. zvýšení či snížení rychlosti proudu vzduchu.



Obr. 5.3 Generátor vzdušného proudu – ventilátor firmy T151



Obr. 5.4 Ventilátor HELAGO v laboratoři fakulty, místnost E309 [16]

Parametry generátoru vzdušného proudu

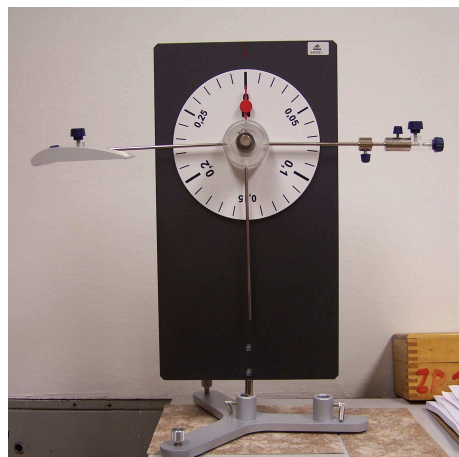
- **Příkon :** max. 1100 W
- **Napětí :** 230 V
- **Frekvence :** 50 / 60 Hz
- **Rozměry :** 300 mm x 180 mm x 170 mm
- **Hmotnost :** 4,4 kg

Váhy pro měření odporu jednotlivých těles

Váhy pro měření odporu viz obr. 5.5 a viz obr. 5.6 jednotlivých těles jsou uchyceny pevně ve stojanu. Na kruhové stupnici jsou umístěny železné tyče, na kterých se na jedné straně umístí požadované těleso pro měření odporu a na druhé straně se toto těleso vyváží do vodorovné polohy, tak aby střílka ukazovala na hodnotu 0 N.



Obr. 5.5 Váhy HELAGO pro měření odporu jednotlivých těles [15]



Obr. 5.6 Váhy HELAGO v laboratoři fakulty, místnost E309 [16]

Parametry Váhy pro měření odporu jednotlivých těles

- **Rozsah měření :** 0 – 0,3 N
- **Průměr kruhové stupnice :** 170 mm
- **Rozměry :** 350 mm x 220 mm
- **Hmotnost :** 0,9 kg

5.2 Sada těles pro měření odporu

Sada obsahuje sedm dřevěných modelů viz obr.5.7, ke kterým je připevněna železná tyčka pro uchycení do váhy pro měření odporu těles. Všechna sedm těles je vyrobeno ze dřeva a na povrchu pokryto lakem šedé barvy kromě jednoho tělesa, které je schválně pokryto drsným povrchem.



Obr. 5.7 Sada sedmi dřevěných těles pro měření [16]

Těleso tvaru koule a polokoule

Těleso pro měření odporu tvaru koule viz obr. 5.8 má průměr $d=50$ mm, je zhotoveno ze dřeva a pokryto šedým lesklým lakem. Těleso pro měření odporu tvaru polokoule viz obr. 5.9 je také zhotoveno ze dřeva, má největší průměr $d=50$ mm a je pokryto šedým lesklým lakem. Na obou dvou předmětech je tenká ocelová tyčka pro uchycení do váhy pro měření odporu jednotlivých těles.



Obr. 5.8 Těleso tvaru koule [16]



Obr. 5.9 těleso tvaru polokoule [16]

Těleso tvaru kruhového disku

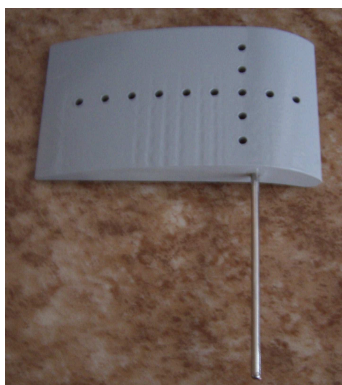
Těleso pro měření odporu tvaru kruhového disku je zhotoveno ze dřeva a potaženo šedým lesklým lakem. K dispozici je těleso tvaru kruhového disku o průměru $d=47$ mm viz obr. 5.10 a těleso tvaru kruhového disku o průměru $d=68$ mm. Na tělesech je také tenká ocelová tyčka pro uchycení.



Obr. 5.10 Těleso tvaru kruhového disku[16]

Těleso tvaru leteckého profilu

Těleso tvaru leteckého profilu viz obr. 5.11 je vyrobeno ze dřeva, na povrchu je natřeno šedým lesklým lakem. Řez leteckého profilu je zobrazen na obrázku viz obr. 5.12.



Obr. 5.11 Těleso tvaru leteckého profilu [16]



Obr. 5.12 Řez leteckým profilem [16]

Těleso tvaru minimálního aerodynamického odporu (kapky)

Těleso tvaru minimálního aerodynamického odporu je vyrobeno ze dřeva, o maximálním průměru $d=50$ mm a potaženo šedým lesklým lakem viz obr 5.13, v případě druhého tělesa tvaru minimálního aerodynamického odporu je také materiálem dřevo, o maximálním průměru $d=50$ mm, avšak povrch tělesa je drsný viz obr. 5.14. Toto zdrsňení povrchu je vytvořeno schválně pro porovnání odporu dvou stejných těles o dvou různých povrchových vrstvách. Obě tělesa jsou opatřena tenkou ocelovou tyčkou pro uchycení.



**Obr. 5.13 Těleso tvaru
minimálního aerodynamického odporu
s hladkým povrchem [16]**



**Obr. 5.14 Těleso tvaru
minimálního aerodynamického odporu
s drsným povrchem [16]**

5.3 Ventilátor HRD 1 TFU-105/1

Ventilátor je osazen vysokootáčkovým elektromotorem viz obr. 5.15, který dosahuje až rychlosti 105 s^{-1} . Při řízení tohoto ventilátoru s pomocí frekvenčního měniče odpadá nutnost mechanické převodovky na ventilátoru, v důsledku toho je tento ventilátor levnější a dává při provozu vysoký komfort a nižší ekonomické vlastnosti. Frekvenční měnič viz obr. 5.16 umožňuje plynulou změnu asynchronních motorů v rozsahu 0–100 %. Frekvenční měnič je umístěn mimo elektromotor ventilátoru. K ventilátoru byla připevněna vzduchová tryska viz obr. 5.17, jenž za normálních okolností je připevněna k původnímu ventilátoru firmy HELAGO.

Parametry ventilátoru HRD 1 TFU-105/1

- **Maximální průtok :** $11 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
- **Provozní napětí :** 230/400 V
- **Maximální výkon :** 900 W
- **Maximální frekvence :** 105 Hz
- **Maximální otáčky :** 6200 min^{-1}
- **Hmotnost :** 16 kg

Parametry frekvenčního měniče KEB COMBIVERT 101651/AR

- **Vstupní frekvence :** 50/60 Hz
- **Maximální výstupní frekvence :** 1600 Hz
- **Napětí :** 230 V
- **Maximální proud :** 7 A
- **Verze :** 1.1



Obr. 5.15 Ventilátor HRD 1 TFU-105/1 [16]



Obr. 5.16 Frekvenční měnič
101651/AR [16]



Obr. 5.17 Sestava se vzduchovou tryskou HELAGO [16]

5.4 Vrtulkový anemometr ALMEMO

Měřicí přístroj se skládá ze dvou částí, první částí je samostatná měřicí jednotka ALMEMO viz obr. 5.18, která nám umožňuje měření několika-ti různých veličin, v našem případě rychlost proudění vzduchu. Na zadní straně přístroje jsou umístěny 4 vstupy pro zapojení měřících snímačů daných veličin, pro snímání rychlosti je použito vrtulkového anemometru viz obr. 5.19.



Obr. 5.18 Měřicí přístroj ALMEMO [20]



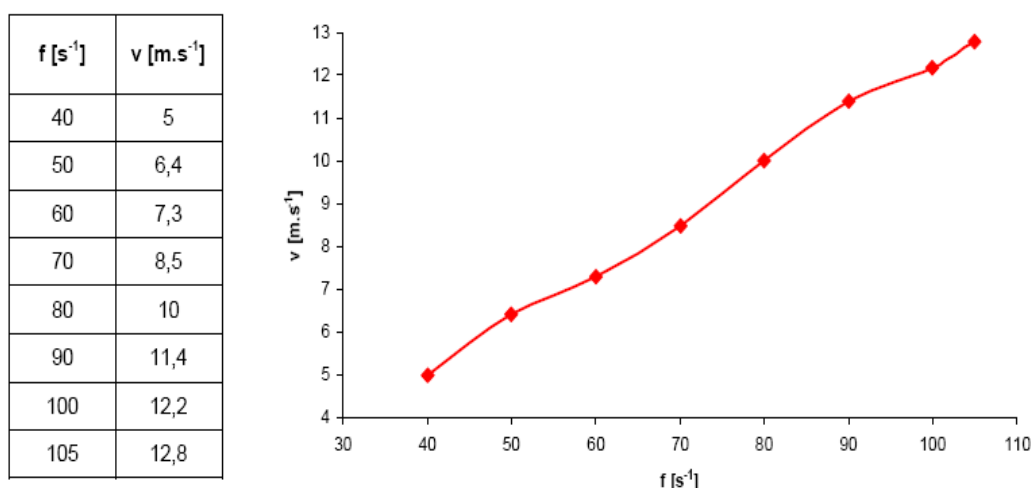
Obr. 5.19 Vrtulkový anemometr

4. MĚŘENÍ SÍLY ODPORU A VZTLAKU PRO TĚLESA RŮZNÉHO TVARU

Měření probíhalo na aerodynamickém přístroji HELAGO a na ventilátoru HRD 1 TFU-105/1 doplněného o vzduchovou trysku z předem uvedeného zařízení.

Na aerodynamické přístroji bylo nejprve nutno určit rychlosti proudění vzduchu ze vzduchové trysky, neboť na generátoru vzdušného proudu byla pouze stupnice výkonu generátoru bez číselných hodnot. Proměření rychlostí proběhlo ve vzdálenosti 15 cm od vzduchové trysky a vždy po 25 % výkonu na stupnici, tedy 25, 50, 75 a 100 % výkonu generátoru vzdušného proudu. Pro měření rychlostí bylo použito vrtulkového anemometru s měřícím přístrojem ALMEMO.

Měření na ventilátoru HRD 1 TFU 105/1 doplněného o vzduchovou trysku bylo obdobné jako měření na aerodynamickém přístroji HELAGO. Rozdíl byl v tom, že na ventilátoru nebylo možno nastavovat rychlosti proudění ani otáčky ventilátoru, k tomuto účelu sloužil frekvenční měnič umístěný nad ventilátorem. Frekvenční měnič mohl měnit libovolně otáčky v rozmezí 0–105 s⁻¹. Závislost frekvence na rychlosti proudění vzduchu ze vzduchové trysky můžeme sledovat viz obr. 4.1. Měření probíhalo pro každé těleso vždy pro frekvence 70, 80, 90 a 100 Hz. Ventilátor byl do této práce zařazen z důvodu, že dává podstatně rovnoměrnější proud vzduchu, než generátor vzdušného proudu a rychlosti proudění tolik nekolísají.



Obr. 4.1 Závislost frekvence ventilátoru HRD 1 TFU 105/1 na rychlosti proudění vzduchu ze vzduchové trysky

4.1 Měření na aerodynamickém přístroji HELAGO

Naměřené hodnoty pro kouli a polokouli o stejném průměru

Polokoule	
v [m.s ⁻¹]	F [N]
4,5	0,009
7,5	0,0105
7,8	0,011
9	0,012

Koule	
v [m.s ⁻¹]	F [N]
4,8	0,004
7,5	0,01
9,1	0,012
10,5	0,013

Vzorový výpočet

$$F_x = c_x \cdot S \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (4.1.1)$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$S = \frac{\pi \cdot 0,05^2}{4} \quad (4.1.2)$$

$$S = 1,963 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$c_x = \frac{F_x \cdot 2}{S \cdot v^2 \cdot \rho}$$

$$c_x = \frac{0,009 \cdot 2}{1,963 \cdot 10^{-3} \cdot 4,5^2 \cdot 1,15} \quad (4.1.3)$$

$$c_x = 0,393[-]$$

Výsledné hodnoty

Polokoule			
v [m.s ⁻¹]	F [N]	c _x [-]	Re [-]
4,5	0,009	0,394	14516
7,5	0,01	0,158	24193
7,8	0,011	0,160	25161
9	0,012	0,131	34838

Koule			
v [m.s ⁻¹]	F [N]	c _x [-]	Re [-]
4,8	0,004	0,154	15483
7,5	0,01	0,158	24193
9,1	0,012	0,128	29354
10,5	0,013	0,104	33871

Naměřené hodnoty pro těleso tvaru kruhového disku o dvou různých průměrech

Kruhový disk o průměru 68 mm	
$v \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	$F \text{ [N]}$
5	0,02
7	0,026
7,5	0,03
8,3	0,031

Kruhový disk o průměru 47 mm	
$v \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	$F \text{ [N]}$
5	0,005
6,9	0,015
7,6	0,022
8,5	0,027

Vzorový výpočet

$$F_x = c_x \cdot S_1 \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (4.1.4)$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot 0,068^2}{4} \quad (4.1.5)$$

$$S_1 = 3,631 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$c_x = \frac{F_x \cdot 2}{S_1 \cdot v^2 \cdot \rho}$$

$$c_x = \frac{0,031 \cdot 2}{3,631 \cdot 10^{-3} \cdot 8,3^2 \cdot 1,15} \quad (4.1.6)$$

$$c_x = 0,215[-]$$

Výsledné hodnoty

Kruhový disk o průměru 68 mm			
$v \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	$F \text{ [N]}$	$c_x [-]$	$Re [-]$
5	0,02	0,383	21935
7	0,026	0,254	30709
7,5	0,03	0,255	32903
8,3	0,031	0,216	36413

Kruhový disk o průměru 47 mm			
$v \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	$F \text{ [N]}$	$c_x [-]$	$Re [-]$
5	0,005	0,200	15161
6,9	0,015	0,316	20922
7,6	0,022	0,382	23045
8,5	0,027	0,375	25774

Naměřené hodnoty pro těleso minimálního odporu tvaru kapky s hladkým a drsným povrchem

Hladký povrch	
v [m.s ⁻¹]	F [N]
4	0
7,5	0,005
8,5	0,006
9	0,007

Drsný povrch	
v [m.s ⁻¹]	F [N]
5	0,005
8	0,01
9	0,012
9,2	0,012

Vzorový výpočet

$$F_x = c_x \cdot S \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (4.1.7)$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$S = \frac{\pi \cdot 0,05^2}{4} \quad (4.1.8)$$

$$S = 1,963 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$c_x = \frac{F_x \cdot 2}{S \cdot v^2 \cdot \rho}$$

$$c_x = \frac{0 \cdot 2}{1,963 \cdot 10^{-3} \cdot 4^2 \cdot 1,15} \quad (4.1.9)$$

$$c_x = 0[-]$$

Výsledné hodnoty

Hladký povrch				Drsný povrch			
v [m.s ⁻¹]	F [N]	c _x [-]	Re [-]	v [m.s ⁻¹]	F [N]	c _x [-]	Re [-]
4	0	0,000	12903	5	0,005	0,177	16129
7,5	0,005	0,071	24193	8	0,01	0,138	25806
8,5	0,006	0,074	27419	9	0,012	0,131	29032
9	0,007	0,077	29032	9,2	0,012	0,126	29677

Hodnoty pro letecký profil při různých úhlech náběhu

v [m.s ⁻¹]	α [°]	F [N]
8	0	0,001
	10	0,008
	20	0,01
	25	0,013
	30	0,015

v [m.s ⁻¹]	α [°]	F [N]
10	0	0,001
	10	0,01
	20	0,013
	25	0,015
	30	0,018

Vzorový výpočet

$$F_x = c_x \cdot S \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (4.1.10)$$

$$S = a \cdot b$$

$$S = 0,062 \cdot 0,012 \quad (4.1.11)$$

$$S = 7,44 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$c_x = \frac{F_x \cdot 2}{S \cdot v^2 \cdot \rho}$$

$$c_x = \frac{0,01 \cdot 2}{7,44 \cdot 10^{-4} \cdot 8^2 \cdot 1,15} \quad (4.1.12)$$

$$c_x = 0,365[-]$$

Výsledné hodnoty

v [m.s ⁻¹]	α [°]	F [N]	c _x [-]
8	0	0,001	0,037
	10	0,008	0,292
	20	0,01	0,365
	25	0,013	0,475
	30	0,015	0,548

v [m.s ⁻¹]	α [°]	F [N]	c _x [-]
10	0	0,001	0,023
	10	0,01	0,234
	20	0,013	0,304
	25	0,015	0,351
	30	0,018	0,421

4.2 Měření na ventilátoru HRD 1 TFU 105/1

Naměřené hodnoty pro kouli a polokouli o stejném průměru

Koule		
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]
70	8,5	0,012
80	10	0,018
90	11,6	0,021
100	12,2	0,023

Polokoule		
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]
70	8,5	0,025
80	10	0,03
90	11,6	0,032
100	12,2	0,033

Vzorový výpočet

$$F_x = c_x \cdot S \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.1)$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$S = \frac{\pi \cdot 0,05^2}{4} \quad (4.2.2)$$

$$S = 1,963 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$c_x = \frac{F_x \cdot 2}{S \cdot v^2 \cdot \rho}$$

$$c_x = \frac{0,021 \cdot 2}{1,963 \cdot 10^{-3} \cdot 11,6^2 \cdot 1,15} \quad (4.2.3)$$

$$c_x = 0,138[-]$$

Výsledné hodnoty

Koule				
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]	c _x [-]	Re [-]
70	8,5	0,012	0,147	27420
80	10	0,018	0,159	32258
90	11,6	0,021	0,138	37419
100	12,2	0,023	0,137	39354

Polokoule				
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]	c _x [-]	Re [-]
70	8,5	0,025	0,306	27420
80	10	0,03	0,266	32258
90	11,6	0,032	0,211	37419
100	12,2	0,033	0,196	39354

Naměřené hodnoty pro těleso tvaru kruhového disku o dvou různých průměrech

Kruhový disk o průměru 68 mm		
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]
70	8,5	0,021
80	10	0,039
90	11,6	0,041
100	12,2	0,043

Kruhový disk o průměru 47 mm		
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]
70	8,5	0,019
80	10	0,036
90	11,6	0,04
100	12,2	0,042

Vzorový výpočet

$$F_x = c_x \cdot S_1 \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.4)$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot 0,068^2}{4} \quad (4.2.5)$$

$$S_1 = 3,631 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$c_x = \frac{F_x \cdot 2}{S_1 \cdot v^2 \cdot \rho}$$

$$c_x = \frac{0,039 \cdot 2}{3,631 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 \cdot 1,15} \quad (4.2.6)$$

$$c_x = 0,187[-]$$

Výsledné hodnoty

Kruhový disk o průměru 68 mm				
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]	c _x [-]	Re [-]
70	8,5	0,021	0,139	37290
80	10	0,039	0,187	32258
90	11,6	0,041	0,146	50890
100	12,2	0,043	0,138	53522

Kruhový disk o průměru 47 mm				
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]	c _x [-]	Re [-]
70	8,5	0,019	0,264	25774
80	10	0,036	0,361	32258
90	11,6	0,04	0,298	35174
100	12,2	0,042	0,283	36993

Naměřené hodnoty pro těleso minimálního odporu tvaru kapky s hladkým a drsným povrchem

Hladký povrch		
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]
70	8,5	0,009
80	10	0,011
90	11,6	0,0125
100	12,2	0,016

Drsný povrch		
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]
70	8,5	0,018
80	10	0,02
90	11,6	0,021
100	12,2	0,023

Vzorový výpočet

$$F_x = c_x \cdot S \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.7)$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$S = \frac{\pi \cdot 0,05^2}{4} \quad (4.2.8)$$

$$S = 1,963 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$c_x = \frac{F_x \cdot 2}{S \cdot v^2 \cdot \rho}$$

$$c_x = \frac{0 \cdot 2}{1,963 \cdot 10^{-3} \cdot 4^2 \cdot 1,15} \quad (4.2.9)$$

$$c_x = 0[-]$$

Výsledné hodnoty

Hladký povrch				
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]	c _x [-]	Re [-]
70	8,5	0,009	0,110	27420
80	10	0,011	0,097	32258
90	11,6	0,0125	0,082	37420
100	12,2	0,016	0,095	39354

Drsný povrch				
f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]	c _x [-]	Re [-]
70	8,5	0,018	0,221	27420
80	10	0,02	0,177	32258
90	11,6	0,021	0,138	37420
100	12,2	0,023	0,134	39354

Hodnoty pro letecký profil při různých uhlech náběhu

Letecký profil $\alpha = 0^\circ$			
$\alpha [^\circ]$	$f [s^{-1}]$	$v [m.s^{-1}]$	$F [N]$
0	70	8,5	0,009
	80	10	0,012
	90	11,6	0,013
	100	12,2	0,017

Letecký profil $\alpha = 10^\circ$			
$\alpha [^\circ]$	$f [s^{-1}]$	$v [m.s^{-1}]$	$F [N]$
10	70	8,5	0,013
	80	10	0,016
	90	11,6	0,019
	100	12,2	0,02

Letecký profil $\alpha = 20^\circ$			
$\alpha [^\circ]$	$f [s^{-1}]$	$v [m.s^{-1}]$	$F [N]$
20	70	8,5	0,018
	80	10	0,021
	90	11,6	0,023
	100	12,2	0,025

Letecký profil $\alpha = 30^\circ$			
$\alpha [^\circ]$	$f [s^{-1}]$	$v [m.s^{-1}]$	$F [N]$
30	70	8,5	0,02
	80	10	0,023
	90	11,6	0,024
	100	12,2	0,026

Vzorový výpočet

$$F_x = c_x \cdot S \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (4.2.10)$$

$$S = a \cdot b$$

$$S = 0,062 \cdot 0,012 \quad (4.2.11)$$

$$S = 7,44 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$c_x = \frac{F_x \cdot 2}{S \cdot v^2 \cdot \rho}$$

$$c_x = \frac{0,018 \cdot 2}{7,44 \cdot 10^{-4} \cdot 8,5^2 \cdot 1,15} \quad (4.2.12)$$

$$c_x = 0,582[-]$$

Výsledné hodnoty

Letecký profil $\alpha = 0^\circ$				
$\alpha [^\circ]$	$f [s^{-1}]$	$v [m.s^{-1}]$	$F [N]$	$c_x [-]$
0	70	8,5	0,009	0,291
	80	10	0,012	0,281
	90	11,6	0,013	0,226
	100	12,2	0,017	0,267

Letecký profil $\alpha = 10^\circ$				
$\alpha [^\circ]$	$f [s^{-1}]$	$v [m.s^{-1}]$	$F [N]$	$c_x [-]$
10	70	8,5	0,013	0,421
	80	10	0,016	0,374
	90	11,6	0,019	0,321
	100	12,2	0,02	0,314

Letecký profil $\alpha = 20^\circ$				
α [°]	f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]	c_x [-]
20	70	8,5	0,018	0,582
	80	10	0,021	0,491
	90	11,6	0,023	0,400
	100	12,2	0,025	0,393

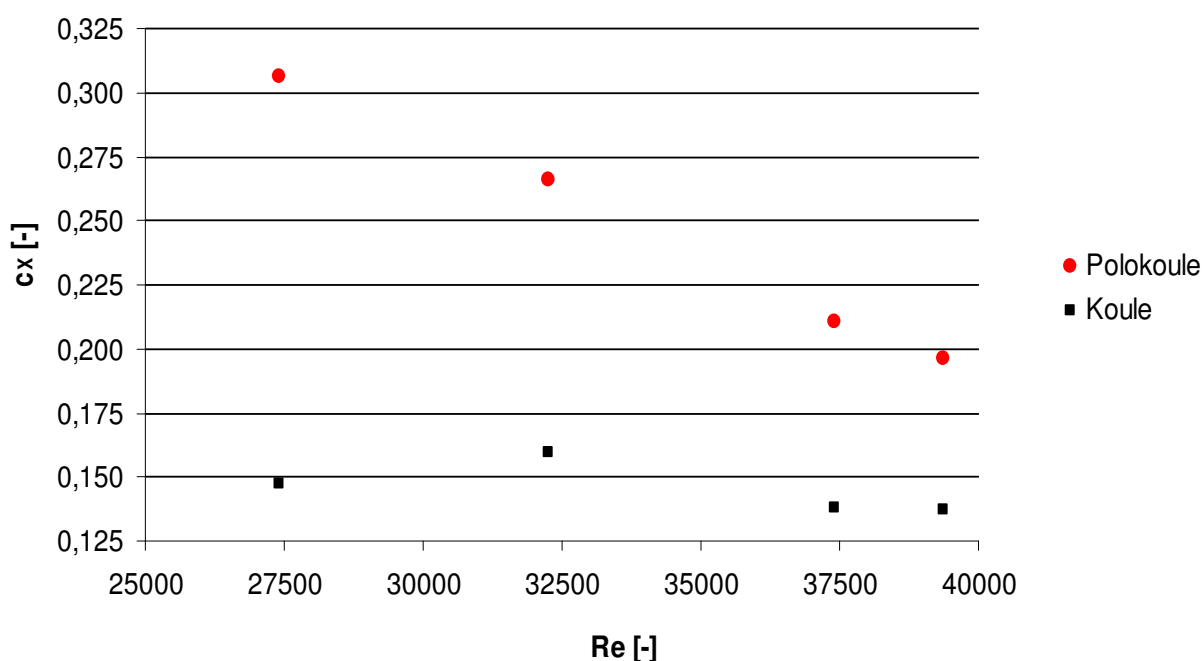
Letecký profil $\alpha = 30^\circ$				
α [°]	f [s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]	F [N]	c_x [-]
30	70	8,5	0,02	0,647
	80	10	0,023	0,538
	90	11,6	0,024	0,417
	100	12,2	0,026	0,408

5. GRAFICKÉ SHRUTÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Srovnání koule a polokoule

Při měření na aerodynamickém přístroji HELAGO a ventilátoru HRD 1 TFU 105/1, je patné, že při obtékání polokoule vzduchem je zpočátku součinitel odporu c_x větší a s vyššími rychlostmi obtékání se snižuje. Při obtékání koule vzduchem je součinitel odporu c_x téměř stejný i při vyšších rychlostech obtékání, jsou zde patrné menší výchyly, ty ale mohly být způsobeny odčítáním ze stupnice vah pro měření odporu, kde každý dílek stupnice značí sílu 0,01 N a v případě umístění jazýčku vah mezi těmito dílky stupnice je velice těžké a velmi přibližné určit přesnou hodnotu odporové síly F_x . Proto bych stanovil součinitel odporu c_x pro kouli při obtékání vzduchem 0,145.

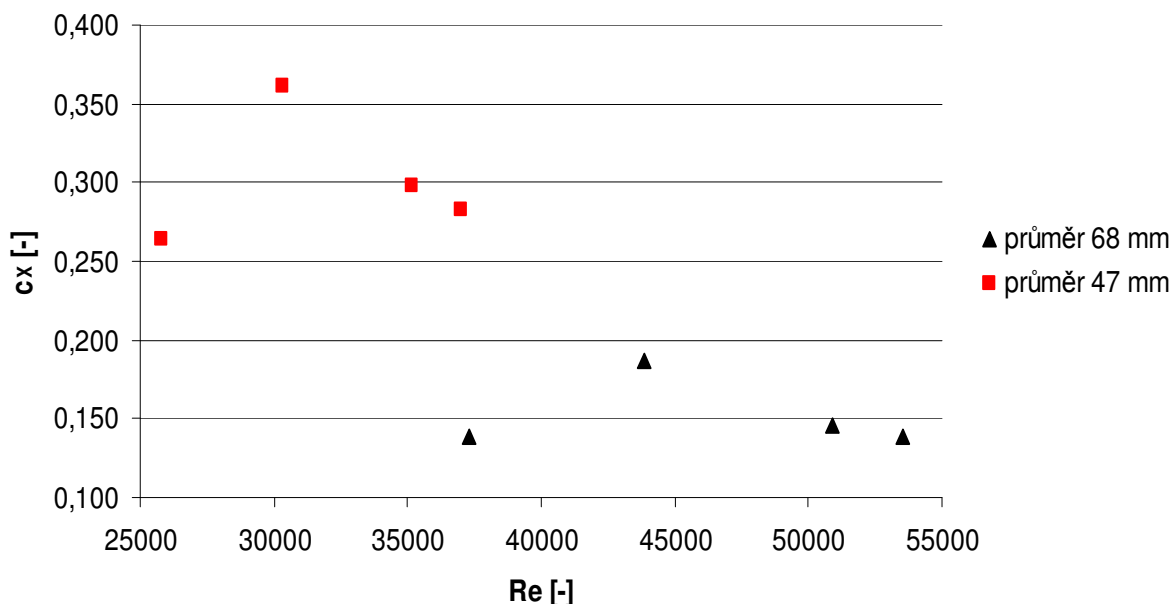
Srovnání odporového součinitele c_x pro kouli a polokouli v závislosti na Re



Srovnání kruhového disku o dvou různých průměrech

V případě srovnání těles kruhového disku se jednalo o zjištění vlivu velikosti průměru tělesa na výsledný odpor při obtékání vzduchem. Při tomto měření můžeme pozorovat také různé menší chyby, které mohly být způsobeny špatným odčítáním ze stupnice vah, které je popsáno ve výše uvedeném odstavci. Součinitel odporu c_x bych zde rozdělil do dvou rychlostních kategorií dle rychlosti proudění vzduchu při obtékání tělesa, kde naměřené hodnoty s menšími odchylkami můžeme považovat za konstantní. První kategorie v rozmezí rychlostí $5-8,5 \text{ m.s}^{-1}$ a druhá kategorie v mezích $8,5-12,2 \text{ m.s}^{-1}$. U kruhového disku o průměru 68 mm bych stanovil součinitel odporu c_x v první kategorii na 0,277 a v druhé kategorii na 0,153. Kruhovému disku o průměru 47 mm v první kategorii bych přiřadil součinitel odporu c_x roven 0,318 a druhé kategorii 0,301. V tomto srovnání můžeme vidět, že i u těchto těles dochází ke snižování součinitele odporu vlivem zvyšující se rychlosti proudění vzduchu při obtékání. Avšak předpoklady tohoto měření byly, že těleso o větším průměru by mělo mít větší součinitel odporu c_x , což se zde nepotvrdilo.

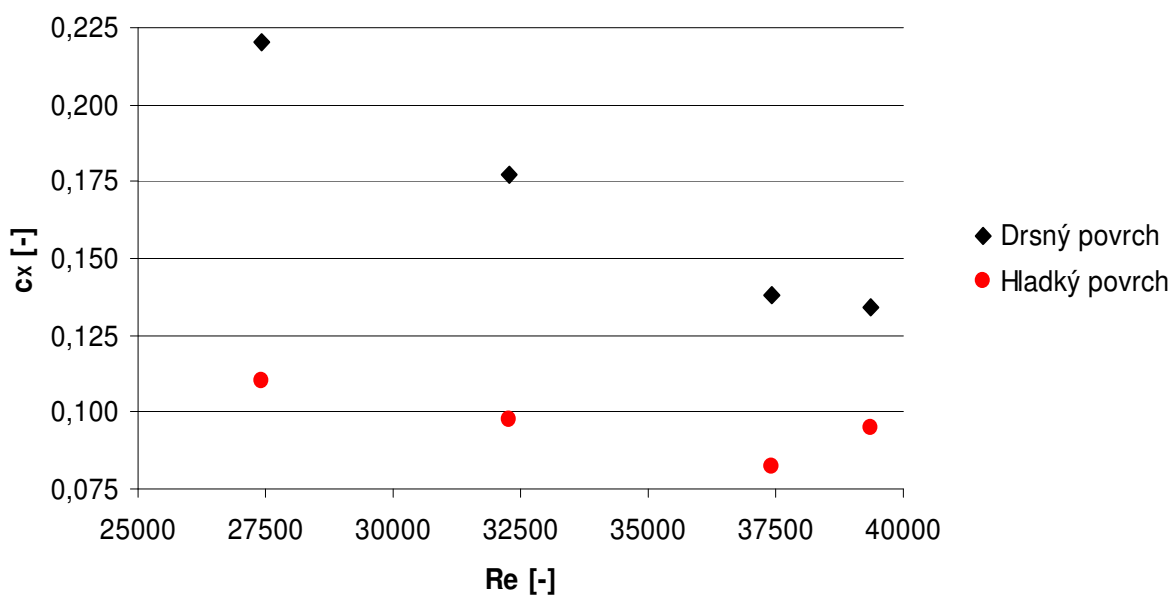
Srovnání odporového součinitele c_x pro tělesa tvaru kruhového disku o dvou různých průměrech v závislosti na Re



Srovnání tělesa minimálního odporu tvaru kapky se dvěma různými povrchy

Při tomto srovnání bylo cílem dokázat, že těleso s drsným povrchem má vyšší součinitel odporu c_x při obtékání, než těleso s hladkým povrchem. Těleso s hladkým povrchem má při velmi malých rychlostech velmi nízký součinitel odporu c_x , který se zde podařilo naměřit od rychlosti $7,5 \text{ m.s}^{-1}$ a vyšší. Samozřejmě, že těleso klade odpor i při menších rychlostech obtékání, ale bylo by potřeba přesnějšího přístroje pro měření odporové síly. Součinitel odporu c_x bych u tělesa s hladkým povrchem stanovil průměrem na 0,08 pro rychlosti proudění $7,5\text{-}12,2 \text{ m.s}^{-1}$. Se vzrůstajícím rychlostmi bude vzrůstat i součinitel odporu. U tělesa s drsným povrchem byl součinitel odporu c_x patrný už při nejmenší měřené rychlosti obtékání. Průměrný součinitel odporu c_x zde stanovují na 0,155. Vliv hladkého a drsného povrchu tělesa na součinitel odporu c_x při obtékání byl zde prokázán. Drsný povrch zde zapříčinil téměř dvojnásobně větší součinitel odporu c_x oproti hladkému povrchu.

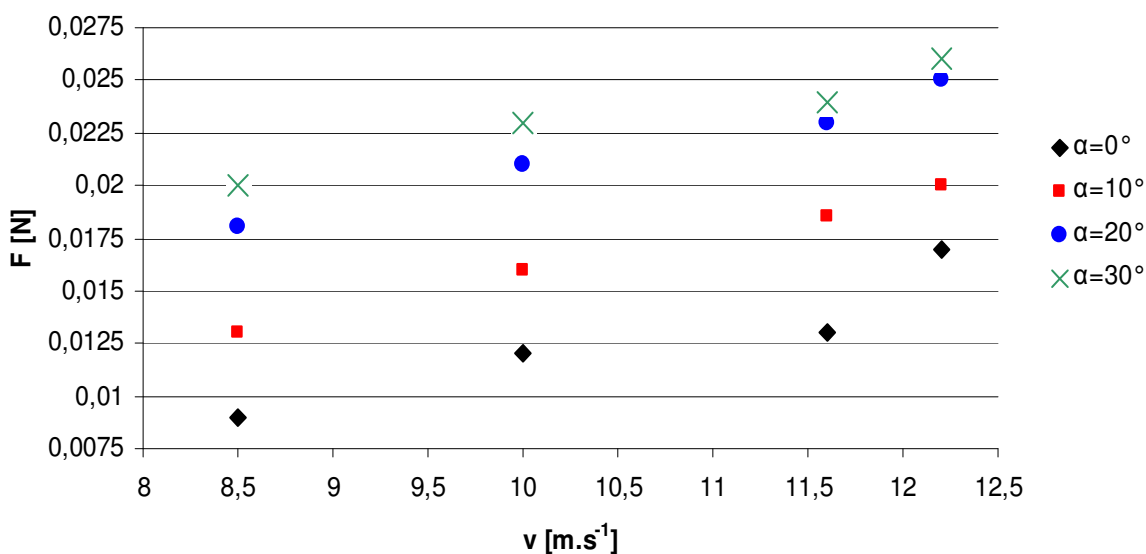
Srovnání odporového součinitele c_x pro tělesa tvaru minimálního odporu se dvěma různými povrchy v závislosti na Re



Srovnání leteckého profilu při různých úhlech náběhu α a rychlostech obtékání

Toto měření bylo velmi obtížné, neboť aerodynamické zařízení HELAGO je uzpůsobeno pro měření součinitele odporu c_x pro letecký profil jen při nulovém úhlu náběhu α . Nastavení úhlu náběhu α se dělo pomocí úhloměru přilepeného na plastovou destičku, která byla upevněna na vodorovnou osu vah pro měření součinitele odporu. Nastavení úhlu náběhu bylo vždy při nulové rychlosti obtékání. Toto měření prokázalo, že součinitel odporu c_x při zvyšujících se rychlostech při různých úhlech náběhu α klesá. Ovšem výsledná aerodynamická síla F při malých rychlostech obtékání a větších úhlech náběhu α je větší, než při stejné rychlosti obtékání s nulovým úhlem náběhu α . Pro srovnání při rychlosti obtékání leteckého profilu $8,5 \text{ m.s}^{-1}$ a nulovém úhlu náběhu α byla výsledná aerodynamická síla F téměř dvojnásobně nižší, než při stejné rychlosti obtékání a úhlu náběhu 30° . Tohoto jevu se aplikuje zejména v letectví, kdy hlavně při přistávání letadla je potřeba co největší vztlačová síla F_Y při co nejnižších rychlostech obtékání leteckého profilu. Děje se tak za pomoci klapek, které zvětší úhel náběhu.

Srovnání výsledné aerodynamické síly F v závislosti na rychlosti v při různých úhlech náběhu α



6. ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ

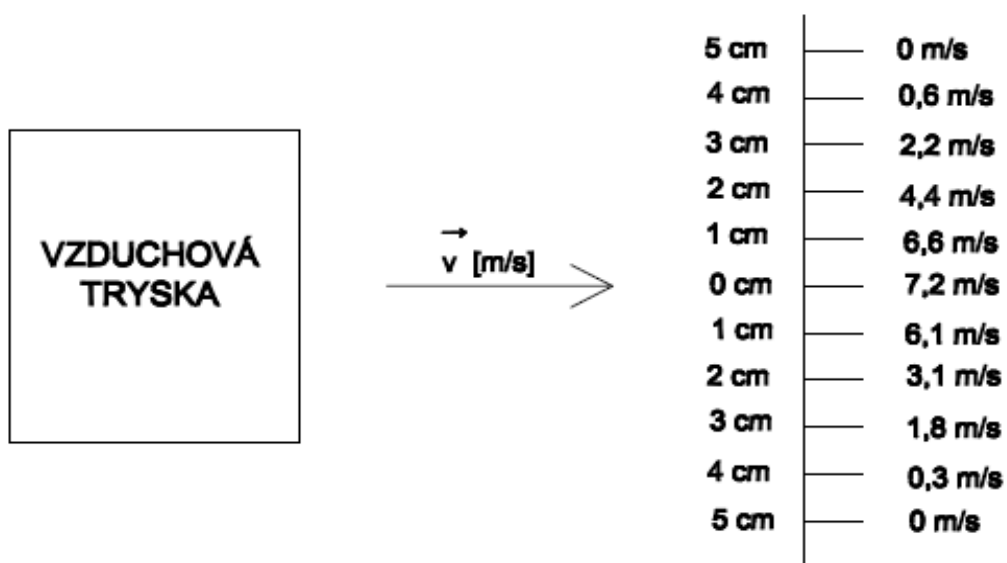
Cílem bakalářské práce bylo vyšetřit odpor a vztlak při obtékání těles různého tvaru. Bylo tak provedeno na aerodynamické přístroji HELAGO, které zadaný úkol splnilo, ovšem přiřadil bych ho spíše pro demonstrativní ukázkou z důvodu řady nepřesností, než pro přesné měření. Údaje udávané výrobcem v instruktážním manuálu, se velmi odlišovaly od skutečnosti. Po důkladném proměření vrtulkovým anemometrem ALMEMO bylo zjištěno, že generátor vzdušného proudu propojený hadicí s tryskou nedává konstantní proudové pole v požadované vzdálenosti, kterou uvádí výrobce a rychlosti proudu vzduchu kolísají. Byl zde naměřen rychlostní profil.

Přesnějšího měření bylo dosaženo, když byl generátor vzdušného proudu HELAGO nahrazen ventilátorem HRD 1 TFU 105/1 s frekvenčním měničem KEB COMBIVERT 101651/AR, avšak pro měření silového účinku proudu vzduchu na těleso bylo použito původní zařízení HELAGO. Ventilátor HRD 1 TFU 105/1 dává podstatně rovnoměrnější proudové pole vzduchu, což se projevilo na větší přesnosti měření. Rychlosti proudění vzduchu nekolísaly jako při použití původního zařízení.

Byly srovnávány vždy dvě tělesa stejného tvaru o odlišné velikosti, nebo tělesa stejného tvaru s odlišným povrchem, v případě leteckého profilu bylo srovnání provedeno pro různé úhly náběhu. Bylo prokázáno, že tvar tělesa a jeho povrch má vliv především na odpor při obtékání proudem vzduchu. U leteckého profilu úhel náběhu ovlivňuje především výslednou aerodynamickou sílu, která působí na letecký profil.

Při konečném srovnání výsledků bylo zhodnoceno, že dané výsledky jsou uspokojivé a splňují předpoklady zadání práce, i když měřicí zařízení slouží spíše pro demonstrativní účely. Výsledné hodnoty součinitele odporu c_x zjištěné měřením odpovídají tabulkovým údajům.

7. PŘÍLOHY



Příloha A Naměřený rychlostní profil na aerodynamickém zařízení HELAGO

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír a kol. . *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické Literatury, 1987. 354 s.
- [2] DRÁBKOVÁ, Sylva et al. *Mechanika tekutin*. [1 DVD-R: barev.] Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1508-4. [online].
Ostrava: VŠB- Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2007. E-learning systém FS VŠB -TUO. Dostupné z WWW: <<http://vyuka.fs.vsb.cz>>
- [3] JANALÍK, Jaroslav; ŠTÁVA, Pavel. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB – TUO, 2002. 125 s.
- [4] JANALÍK, Jaroslav. *Vybrané kapitoly z mechaniky tekutin – Navier-Stokesova rovnice*. Ostrava, 2002. 12 s.
- [5] BRDIČKA, Miroslav; SAMEK, Ladislav; SOPKO, Bruno. *Mechanika kontinua*. Praha: Academia, Vydání 2., Opravené, 2000. 799 s.
- [6] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Potenciální proudění*. Ostrava: VŠB – TUO, 1984. 88 s.
- [7] JANALÍK, Jaroslav. *Obtékání a odpor těles*. Ostrava, 2008. 109 s.
- [8] Obrázek dostupný z WWW:<http://www.slavetind.cz/stavba/obrazky/Mechanika/Mech_sour_sous2.jpg> [cit. 2010-12-5]
- [9] Obrázek dostupný z WWW:<<http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php>> [cit. 2010-12-5]
- [10] VYKOUK, Vlastimil. *Aerodynamika a mechanika letu pro pilota závěsných kluzáků*. Praha, TZ SPORTPROPAG, 1981. 92 s.
- [11] Obrázek dostupný z WWW:<http://www.techmania.cz/edutorium/data/fil_0990.gif> [cit. 2010-12-8]
- [12] Obrázek dostupný z WWW:<<http://texasbestgrog.mu.nu/images/F-18Front.jpg>> [cit. 2010-12-8]
- [13] Obrázek dostupný z WWW:<http://dnynato.cz/fotogalerie_show.php?od=0&id_gal=7> [cit. 2010-12-8]
- [14] JANALÍK, Jaroslav. *Vybrané kapitoly z mechaniky tekutin – Poznámky k přednáškám 1. část*. Ostrava, 2002. 49 s.

- [15] Obrázek dostupný z WWW:<<http://www.helago-cz.cz/product>> [cit. 2010-12-10]
- [16] Vlastní fotografie pořízené při měření bakalářské práce, KODAK Z750
- [17] Obrázek dostupný z WWW:< http://i.pravda.sk/07/103/skcl/P121eb484_Lietadlo.jpg> [cit. 2010-12-10]
- [18] Aerodynamics for Students dostupné z WWW:<<http://www.aeromech.usyd.edu.au/aero/contents.html>> [cit. 2011-26-4]
- [19] BAUER, František; BRŮHA, Oldřich; JAŇOUR, Zbyněk..*Základy proudění*. Praha: Vědecko-Technické Nakladatelství, 1950, 232 s.
- [20] ALMEMO. *Operating Instructions–Multifunctional Measuring Instruments*. 1998, 44 s.
Manuál dostupný v pdf verzi

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Sylvě Drábkové, Ph.D. za čas, zájem a připomínky, které věnovala mé bakalářské práci. Dále bych chtěl tímto poděkovat také Katedře hydromechaniky a hydraulických zařízení VŠB-TUO za poskytnutí podmínek pro vypracování a vznik této bakalářské práce.

.....
Jiří Kukelka